

IEEE 802.11ac sebagai Standar Pertama untuk Gigabit Wireless LAN

Afdhal dan Elizar

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Darussalam, Banda Aceh 23111
e-mail: afdhal@unsyiah.ac.id

Abstrak—Saat ini teknologi WLAN telah digunakan secara luas. Teknologi ini dinilai sangat tepat sebagai media perpindahan data dalam lingkungan LAN/MAN. Untuk memastikan bahwa teknologi WLAN dapat digunakan secara meluas di semua belahan dunia, IEEE menetapkan 802.11 sebagai standar internasional untuk teknologi WLAN ini. Sejak kemunculannya tahun 1997, IEEE telah melakukan perubahan beberapa kali terhadap standar ini. Perubahan ini dilakukan untuk mengantisipasi pertumbuhan pasar WLAN yang bergerak cepat sehingga penggunaan teknologi ini tetap handal, efektif dan efisien. Awal tahun ini, IEEE kembali menetapkan 802.11ac-2013 sebagai standar baru untuk WLAN yang beroperasi pada frekuensi di bawah 6 GHz dengan kecepatan aliran data yang hampir mencapai 7 Gbps. Adapun maksud dan tujuan artikel ini adalah untuk memaparkan secara komprehensif tentang IEEE 802.11ac sebagai hasil perubahan terbaru terhadap regulasi WLAN yang merupakan standar pertama yang dikeluarkan IEEE untuk gigabit WLAN. Pada artikel ini akan dibahas tujuan dan sasaran yang ingin dicapai oleh standar tersebut serta bagian-bagian yang telah mengalami perubahan secara signifikan baik dari sisi lapisan PHY maupun MAC. Selain itu, artikel ini juga akan membandingkan secara kontras perbedaan antara standar 802.11ac dibandingkan dengan standar WLAN yang telah digunakan sebelumnya. Artikel ini juga akan menjelaskan tentang tingkat kompatibilitas dan interoperabilitas dengan standar-standar yang telah ditetapkan sebelumnya.

Kata kunci: *IEEE, 802.11, 802.11ac, Gigabit WLAN*

Abstract—WLAN is a technology that currently has been used widely. This technology is considered as a data transferring media technology within the LAN/MAN. To ensure that WLAN technology can be used widely in the whole world, the IEEE has set a standard known as 802.11 to be an international standard for the WLAN technology. This standard was appeared in 1997, and has been revised and improved for several times. This improvement is done to anticipate the rapidly grown WLAN market as well as to keep this technology remains effective, efficient, and reliable at any time. At the beginning of 2014, the IEEE has set 802.11ac-2013 as a new standard for WLANs that operate below 6 GHz to achieve a data rate for up to 7 Gbps. The purpose of this article is to describe comprehensively the IEEE 802.11ac standard as a result of recent changes to the regulatory for WLAN technology which is known as the first standard issued by the IEEE for the gigabit WLANs. This article discusses the goals and objectives to be achieved by 802.11ac standard as well as the parts that have been enhanced significantly both in its PHY and MAC layers. This article will also contrast the differences between the 802.11ac standard and previous WLAN standards. Finally it will also explain the level of compatibility and interoperability of 802.11ac standards with some of previous WLAN standard.

Keywords: *IEEE, 802.11, 802.11ac, Gigabit WLAN*

I. PENDAHULUAN

Dalam satu dekade terakhir ini, penggunaan perangkat-perangkat personal berbasis pada teknologi jaringan nirkabel telah digunakan secara luas oleh masyarakat pengguna Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK). Saat ini keberadaan perangkat-perangkat bergerak (*mobile devices*) telah tersedia dengan beragam tipe dan model di pasaran. Selain memanfaatkan jaringan seluler (GSM, 3G, LTE) untuk media koneksinya, perangkat bergerak seperti *smartphone* dan tablet PC juga telah dilengkapi oleh teknologi jaringan area lokal nirkabel (WLAN) sebagai salah satu pilihan media transmisi untuk pertukaran data. Menurut data dari *International Data Corporation*

(IDC), untuk tahun 2013 tingkat produksi dan penyebaran *smartphone* mencapai 162,3 juta unit per-tahun, dan untuk tahun 2014 diprediksikan akan meningkat lagi sebanyak 36,2% atau 221 juta unit [1].

Wireless LAN (WLAN) atau disebut juga *Wireless-Fidelity* (Wi-Fi) merupakan teknologi yang digunakan untuk melakukan perpindahan data dari satu perangkat ke perangkat lainnya tanpa menggunakan kabel sebagai media transmisinya dengan memanfaatkan radiasi elektromagnetik atau disebut juga gelombang radio. Meskipun kehadiran teknologi ini tidak menggantikan peran jaringan kabel secara keseluruhan, namun sejak kehadirannya teknologi ini telah memudahkan penggunaannya untuk terkoneksi ke jaringan global.

Misalnya, dengan satu unit perangkat *Access point* (AP) yang telah terkoneksi ke jaringan global, berbagai jenis perangkat bergerak seperti laptop, tablet PC, dan *smartphone* dapat dengan mudah terhubung ke jaringan internet secara nirkabel [2].

IEEE sebagai lembaga standarisasi internasional untuk perangkat elektronik telah menetapkan sebuah standar khusus untuk mengatur regulasi penggunaan jaringan nirkabel ini. Pada tahun 1997, IEEE telah menyetujui dan menetapkan IEEE 802.11 sebagai standar regulasi untuk penggunaan jaringan nirkabel secara global. Namun seiring dengan meningkatnya kebutuhan pengguna, IEEE telah membuat beberapa penyesuaian standar terhadap teknologi ini. Dalam satu dekade terakhir standar dan regulasi untuk teknologi jaringan Wi-Fi telah dilakukan beberapa perubahan. Perubahan pertama untuk standar jaringan nirkabel diawali oleh IEEE 802.11a, diikuti dengan IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, dan IEEE 802.11n. Namun sampai dengan ditetapkannya IEEE 802.11n sebagai standar, masih terdapat beberapa keterbatasan-keterbatasan pada standar tersebut sehingga mengharuskan IEEE untuk melakukan amandemen terhadap standar yang telah ada. Pada awal tahun 2014, IEEE menyetujui untuk menetapkan IEEE 802.11ac sebagai standar terbaru untuk teknologi jaringan nirkabel, sehingga teknologi ini dapat lebih handal dari sebelumnya.

IEEE 802.11ac merupakan generasi penerus standar teknologi Wi-Fi yang ke lima dimana standar ini ditujukan untuk mendapatkan *multi-user throughput* yang lebih tinggi didalam lingkungan jaringan area lokal nirkabel. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan pengalaman pengguna WLAN dengan menyediakan kecepatan *data rates* hingga 7 Gbps dengan pita frekuensi 5 GHz sehingga dapat diperoleh kecepatan sepuluh kali lebih cepat dari standar yang telah dikeluarkan sebelumnya. Selain itu, IEEE 802.11ac juga telah mempertimbangkan berbagai faktor, seperti jarak, gangguan mitigasi, ketahanan koneksi, roaming, kehandalan dan sistem ketersediaan yang lebih baik. IEEE 802.11ac juga menawarkan teknologi antena dengan *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO) dua kali lipat lebih banyak dari IEEE 802.11n, sehingga metode transmisinya (Tx/Rx) lebih baik dari pada teknologi Wi-Fi yang telah ada sebelumnya [3].

Oleh karena itu, artikel ini akan memaparkan secara komprehensif tentang IEEE 802.11ac sebagai hasil perubahan terbaru terhadap regulasi jaringan nirkabel, dimana standar ini disebut-sebut sebagai standar gigabit WLAN. Pada artikel ini akan dibahas tujuan dan sasaran-sasaran yang ingin dicapai oleh penetapan standar tersebut yang disertai dengan pembahasan bagian-bagian yang telah ditingkatkan dan telah mengalami perubahan secara drastis baik dari sisi lapisan PHY maupun lapisan MAC.

Selain itu, artikel ini juga akan membandingkan secara kontras perbedaan standar regulasi IEEE 802.11ac dibandingkan dengan standar-standar jaringan nirkabel sebelumnya yang diikuti dengan penjelasan tentang kelebihan dan keterbatasan yang dimiliki oleh masing-masing jenis standar yang telah ditetapkan sebelumnya.

II. MOTIVASI

Sebagai dampak langsung dari tingginya tingkat penetrasi pasar terhadap penggunaan teknologi WLAN telah mengharuskan IEEE untuk melakukan penyesuaian dan membuat sejumlah perubahan-perubahan untuk standar-standar yang telah dikeluarkan sebelumnya. Munculnya IEEE 802.11ac sebagai standar baru jaringan area lokal nirkabel berpotensi untuk terjadinya perubahan desain, instalasi dan konfigurasi dasar dari sisi pengguna sehingga perlu perencanaan penggunaan teknologi ini dimasa mendatang.

IEEE 802.11ac akan memungkinkan pengguna perangkat TIK untuk membangun infrastruktur Wi-Fi dengan jangkauan yang lebih luas dan lebih efisien dengan penggunaan pita frekuensi 5 GHz serta mendukung pengembangan kapasitas jaringan nirkabel yang mempunyai *throughput* yang lebih tinggi dalam mendistribusikan *multimedia streaming*. Kehadiran 802.11ac dapat memungkinkan para pengguna kelas *Enterprise* untuk mengadopsi teknologi ini secara luas, dimana selama ini diketahui bahwa para pengguna WLAN sebelumnya lebih banyak didominasi oleh pengguna kelas *Small Medium Business* (SMB).

Namun di lain sisi, Wi-Fi Alliance (WFA) sebagai organisasi standarisasi industri dan berbagai vendor perangkat Wi-Fi ini sedang gencar-gencarnya memasarkan perangkat WLAN berbasis pada standar IEEE 802.11n ke para penggunanya. Hal ini memunculkan pertanyaan bagaimana dengan investasi yang telah dikeluarkan sebelumnya oleh sejumlah pengguna untuk perangkat Wi-Fi 802.11n. Selain itu, munculnya standar baru ini juga diiringi oleh sejumlah pertanyaan lainnya, misalnya apakah teknologi baru ini kompatibel dengan teknologi sebelumnya, apakah teknologi ini dapat mengakomodir perangkat-perangkat yang telah dimiliki oleh pengguna.

Oleh karena itu, penulis termotivasi untuk memaparkan secara komprehensif tentang keberadaan standar IEEE 802.11ac terbaru ini, dimana teknologi ini menawarkan teknologi dengan tingkat kehandalan jaringan nirkabel yang memiliki kecepatan sepuluh kali lipat lebih cepat dari teknologi yang ada sebelumnya dan bahkan dijanjikan akan sama dengan penggunaan kecepatan jaringan melalui kabel. Penulis juga ingin membahas permasalahan penggunaan regulasi *bandwidth* yang ditawarkan oleh standar baru ini, karena meskipun IEEE 802.11a dan IEEE 802.11n telah menawarkan pita frekuensi *dual-band* namun selama ini diketahui bahwa pengguna frekuensi jaringan Wi-Fi kebanyakan beroperasi pada pita frekuensi 2.4 GHz dan masih sedikit yang bermigrasi ke pita frekuensi 5 GHz.

Seperti kebanyakan teknologi baru lainnya, teknologi Wi-Fi baru ini akan segera diadopsi oleh sejumlah perusahaan-perusahaan produsen perangkat jaringan. Bahkan pemain besar seperti Cisco telah mulai menjual perangkat jaringan nirkabel dengan standar IEEE 802.11ac ke pasar contohnya perangkat *Cisco Aironet Access point Module for 802.11ac* [4]. Perangkat ini merupakan perangkat *access point* komersial pertama yang

dikeluarkan oleh vendor perangkat Teknologi Informasi (TI) dengan standar operasi sinyal radio *dual-band* yang berbasis pada standar IEEE 802.11n dan standar IEEE 802.11ac, sehingga memungkinkan penggunaanya untuk bermigrasi ke standar jaringan area lokal nirkabel yang baru ditetapkan oleh IEEE dan WFA sebagai standar gigabit WLAN [5]. Perangkat ini menawarkan kinerja jaringan nirkabel yang sama handalnya seperti penggunaan kabel untuk mendukung *High Definition* (HD) *Video* dengan tingkat kepadatan penyebaran yang tinggi ke penggunaanya [4].

III. TEKNOLOGI DAN STANDAR WIRELESS LAN

Jaringan area lokal nirkabel merupakan teknologi yang memanfaatkan gelombang radio sebagai media transmisi untuk melakukan transaksi pertukaran data antar komputer dalam ruang lingkup area lokal. Bermula pada tahun 1997, IEEE sebagai lembaga standarisasi internasional untuk perangkat elektronik menginisiasi dan menetapkan sebuah standar IEEE 802.11 sebagai standar regulasi pertama untuk teknologi jaringan nirkabel. IEEE 802.11 menetapkan regulasi untuk lapisan Media Access Control (MAC), manajemen MAC dan tiga regulasi untuk lapisan *Physical* (PHY). PHY terdiri dari sebuah *infrared baseband* dan dua metode modulasi. Standar ini menetapkan bahwa pengoperasian *bandwidth* untuk IEEE 802.11 dapat ditentukan dengan dua metode modulasi yaitu *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) dan *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS). Metode modulasi DSSS menetapkan bahwa besar *bandwidth* adalah 2 Mbps dengan fallback 1 Mbps pada lingkungan dengan derau tinggi (*noise*). Sedangkan FHSS menetapkan *bandwidth*nya dapat beroperasi dari 1 Mbps dan memiliki kemungkinan dapat beroperasi 2 Mbps pada lingkungan ramah atau tanpa derau (*noise-less*). Kedua metode modulasi ini ditetapkan beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz [6,7].

Secara mendasar, teknologi WLAN dikelompokkan menjadi dua tipe jaringan, yaitu: jaringan WLAN infrastruktur konvensional dan jaringan WLAN ad-hoc. WLAN infrastruktur konvensional mengandalkan *Basic Service Sets* (BSS) sebagai pusat AP dimana semua *client* dapat saling terkoneksi melalui infrastruktur BSS, sedangkan jaringan WLAN Ad-hoc beroperasi tanpa BSS dimana konektivitasnya berlangsung secara Ad-hoc antar *client* dengan *client*. Tipe jaringan Ad-hoc juga

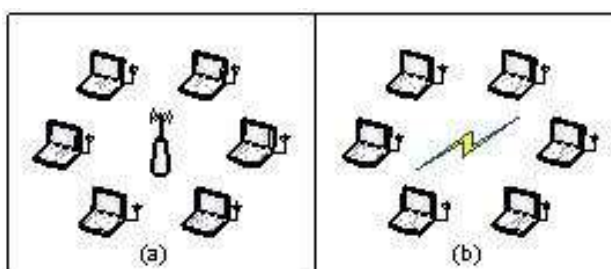
dikenal dengan istilah Independent BSS atau non-BSS [2]. Ilustrasi perbedaan antara jaringan nirkabel BSS dan non-BSS dapat dilihat pada Gambar 1.

Dalam rangka meningkatkan kehandalan WLAN, pada tahun 1999 IEEE merilis IEEE 802.11a-1999 sebagai amandemen pertama terhadap standar IEEE 802.11-1997. Ada dua hal utama yang direvisi yaitu: metode modulasi dan alokasi pita frekuensi. Metode modulasi yang digunakan untuk IEEE 802.11a adalah *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), sedangkan alokasi pita frekuensi yang ditetapkan untuk pengoperasiannya adalah 5 GHz. OFDM merupakan teknik modulasi untuk penyebaran spektrum radio yang beroperasi dengan membagi sebuah *channel* kedalam beberapa *sub-channel* dan mengkodekan satu porsi sinyal melewati setiap *sub-channel* secara paralel [2].

Dalam perkembangan lanjutan, teknik penyebaran spektrum radio pada lapisan PHY WLAN dilakukan beberapa kali perubahan yang meliputi: IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, dan IEEE 802.11ac. Perbedaan utama dari seluruh tipe-tipe penyebaran spektrum radio terletak pada alokasi pita frekuensi, dimana DSSS dan FHSS beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz dan OFDM yang beroperasi pada pita frekuensi 5 GHz. Alokasi pita frekuensi untuk penyebaran spektrum radio WLAN sebagaimana yang telah ditetapkan dalam standar 802.11 adalah *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) radio bands dengan range frekuensi 2,4 - 2,5 GHz (S-Band ISM) untuk WLAN yang beroperasi pada pita frekuensi rendah dan 5,725 - 5,875 GHz (C-Band ISM) untuk WLAN yang beroperasi pada pita frekuensi tinggi. ISM adalah range frekuensi yang tidak memerlukan lisensi (*unlicensed band*) atau penggunaannya dapat digunakan secara bebas (*free*) oleh para pengguna [2].

Meningkatnya penggunaan perangkat nirkabel dan meluasnya penggunaan Wi-Fi secara signifikan telah membuat tingkat ketergantungan pengguna terhadap teknologi ini menjadi sangat tinggi. Hal ini membuat produsen-produsen perangkat nirkabel berlomba-lomba untuk meningkatkan kehandalan teknologi ini, mulai dari peningkatan kapasitas, perluasan jarak dan jangkauan area radio, sampai dengan peningkatan sejumlah algoritma cerdas (*embedded intelligent algorithms*) dengan memitigasi interferensi radio untuk meningkatkan kapasitas *throughput* yang tinggi. Oleh karena itu pada tahun 2000, WFA sebagai salah satu aliansi pengguna perangkat nirkabel mengatur industri-industri yang mengadopsi teknologi WLAN dan melakukan sertifikasi interoperabilitas antar vendor yang dikenal dengan istilah *Wi-Fi certified*. Hal ini bertujuan agar untuk memastikan seluruh vendor memproduksi perangkat jaringan nirkabel berbasis pada protokol standar IEEE 802.11, sehingga operabilitas antar perangkat seluruh dunia adalah standar dan dapat dipergunakan secara luas diseluruh dunia [6].

Pada dasarnya IEEE 802.11 bukan merupakan standar yang berdiri sendiri, namun merupakan bagian dari IEEE 802 yang telah ditetapkan IEEE pada tahun 1990 atau dikenal dengan IEEE 802-1990 atau dikalangan



Gambar 1. (a). BSS (b) non-BSS

administrator jaringan lebih familiar dikenal dengan istilah Ethernet. IEEE 802 adalah sebuah standar yang ditetapkan oleh IEEE untuk *Local Area Networks* (LAN) dan *Metropolitan Area Networks* (LAN/MAN). Hal ini menyebabkan IEEE 802.11 merupakan standar khusus jaringan nirkabel yang beroperasi pada lingkungan LAN/MAN. WLAN merupakan bagian dari LAN yang beroperasi secara nirkabel dengan memanfaatkan propagasi frekuensi radio (RF) [7].

Standar IEEE 802 memiliki spesifikasi yang difokuskan untuk dua lapisan terbawah dari model TCP/IP dan lapisan OSI, yaitu lapisan fisik (PHY) dan lapisan data link (MAC). Kedua komponen pada lapisan tersebut harus bekerja sama antara satu dan lainnya secara sekaligus. Lapisan PHY mengatur detail dari proses modulasi dan transmisi pengiriman penerimaan (Tx/Rx) sedangkan MAC mengatur sejumlah regulasi bagaimana cara mengakses lapisan medium dan proses pengiriman data [2]. Hubungan antar standar-standar dalam keluarga IEEE 802 dapat dilihat pada Gambar 2.

Seiring dengan perjalanan waktu, penggunaan teknologi WLAN berkembang dengan pesat diseluruh belahan bumi. Teknologi ini sangat efektif dan efisien untuk memfasilitasi pertukaran data dalam lingkungan area lokal dan metropolitan. Namun demikian, penggunaan teknologi ini sangat sering dikaitkan dengan sejumlah keterbatasan yang dimiliki pada lapisan PHY dan MAC sehingga muncul sejumlah isu yang berkaitan dengan kinerja, seperti kapasitas *throughput*, *datarate*, jarak dan jangkauan, interferensi gelombang radio, ukuran *channel*, dan keamanan jaringan. Sejumlah perubahan terhadap teknologi dan standar WLAN dapat dijelaskan sebagai berikut:

A. IEEE 802.11-1999 (802.11a dan 802.11b)

IEEE 802.11-1999 merupakan amandemen yang pertama kali dilakukan terhadap standar IEEE 802.11-1997. Standar ini mendefinisikan tentang protokol dan interkoneksi peralatan yang kompatibel untuk memfasilitasi pertukaran data via udara baik radio maupun infrared dalam lingkungan jaringan area lokal menggunakan mekanisme *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) pada lapisan MAC untuk mendukung operasi pertukaran data baik menggunakan AP atau secara independen. Pada lapisan MAC, protokol

ini juga mengatur prosedur layanan autentikasi, asosiasi, de-asosiasi, dis-asosiasi, distribusi, integrasi, privasi, reasosiasi dan MSDU *delivery* [8].

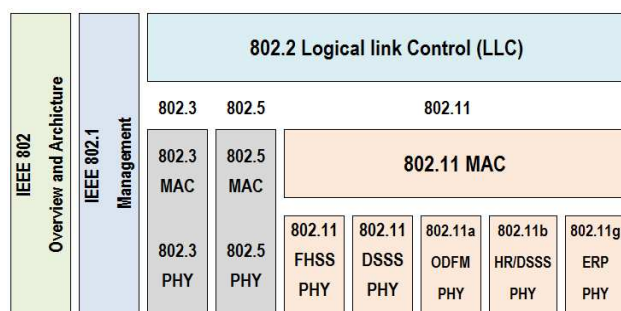
Standar IEEE 802.11-1999 terdiri dari dua suplemen yaitu 802.11a dan 802.11b. IEEE 802.11a merupakan ekstensi untuk *Higher-Speed Physical Layer* yang beroperasi pada pita frekuensi 5 GHz, sedangkan IEEE 802.11b merupakan ekstensi untuk *Higher-Speed Physical Layer* yang beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz. Standar 802.11a menetapkan OFDM sebagai teknik penyebaran spektrum radio dengan tujuan untuk mendukung *datarate* sampai dengan 54 Mbps dengan menggunakan alokasi pita frekuensi 5 GHz. Berbeda dengan saudara kembarnya, IEEE 802.11b menetapkan bahwa metode penyebaran spektrum radio menggunakan HR/DSSS untuk mendukung peningkatan *data rate* sampai dengan 11 Mbps yang bekerja pada pita frekuensi 2,4 GHz [8, 9, 10, 11].

Meskipun 802.11a menjanjikan *data rate* yang lebih besar, namun sampai dengan 802.11-1999 dirilis, standar ini kurang mendapatkan perhatian dan simpati dari pasar (vendor) dikarenakan faktor jarak jangkauan yang rendah, faktor harga dan keterbatasan kemampuannya untuk mendukung kelas pengguna *enterprise* seperti permasalahan konektivitas dan interferensi radio yang sangat signifikan serta tidak dapat memenuhi keinginan pengguna kelas *enterprise* untuk memanfaatkan teknologi jaringan nirkabel ini sebagai pengganti jaringan kabel. Sebaliknya para vendor perangkat jaringan lebih tertarik pada standar 802.11b dikarenakan standar ini menjanjikan peningkatan *datarate* sampai dengan 11 Mbps. Walaupun *datarate* yang ditetapkan oleh 802.11a lebih besar, namun 802.11b dinilai kinerjanya lebih stabil dari sisi teknologi radio dan lebih rasional dari sisi harga, sehingga 802.11b sangat signifikan mendominasi keseluruhan pasar, khususnya untuk kelas SMB [5].

B. IEEE 802.11g-2003

Tantangan utama dalam pengembangan awal teknologi WLAN adalah konektivitas dan interferensi radio. Namun disisi lain yang dihadapi adalah tuntutan pasar terhadap teknologi ini meningkat secara drastis. Diakui atau tidak, teknologi ini mulai merubah paradigma dalam penggunaan jaringan sebagai media transfer data. Pasar menilai bila teknologi ini mampu meningkatkan kestabilan hal dalam konektivitas dan mampu menghasilkan *throughput* yang besar, maka tidak mustahil WLAN akan merebut pasar jaringan berbasis kabel secara signifikan [5].

Oleh karena itu, IEEE working group mulai mengajukan proposal perubahan terhadap standar WLAN sebelumnya, khususnya untuk mengakomodir permintaan pasar untuk *throughput* yang lebih baik. Setelah menjalani perdebatan yang panjang, pada tahun 2003 IEEE memutuskan untuk mengeluarkan perubahan terhadap standar 802.11-1999, dengan menetapkan standar baru 802.11g-2003. Munculnya standar ini dipicu oleh keterbatasan interoperabilitas 802.11a yang beroperasi dengan OFDM



Gambar 2. IEEE 802 Family [2]

pada pita frekuensi 5 GHz, dimana banyak perangkat nirkabel yang tidak kompatibel dengan standar tersebut. Selain itu munculnya 802.11g juga untuk mengantisipasi jarak area jangkauan yang relatif lebih pendek dan biaya pengembangan 802.11a yang dianggap kurang rasional. Namun demikian, secara mendasar 802.11g-2003 tidak mengganti standar sebelumnya, namun mengambil manfaat dari metode OFDM sehingga PHY dapat ditingkatkan. Standar 802.11g dinamakan dengan "Futher Higher Data Rate Extension in the 2,4 GHz band". Standar ini menetapkan metode penyebaran spektrum radio menggunakan OFDM yang dapat mendukung *datarate* sampai dengan 54 Mbps dan beroperasi pada pita frekuensi 2.4 GHz [12].

Pemanfaatan OFDM pada pita frekuensi 2.4 GHz dinilai dapat meningkat *throughput* dan kestabilan koneksi WLAN. Perubahan ini juga berdampak signifikan terhadap kenaikan *datarate* dimana sebelumnya 802.11b HR/DSSS hanya mendukung 1, 2, 5.5, dan 11 Mbps, namun dengan munculnya 802.11g terdapat opsi penambahan *datarate* untuk pengintegrasian DSSS/OFDM sehingga Extended Rate PHY (ERP PHY) dapat mendukung 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mbps. DSSS-OFDM adalah opsi yang disediakan 802.11g dan merupakan sebuah sistem modulasi hybrid untuk mengkombinasikan sebuah preamble dan header DSSS dengan sebuah muatan transmisi OFDM (OFDM *payload transmission*) [12]. IEEE 802.11g ERP PHY menyediakan kompatibilitas terhadap DSSS, sehingga memungkinkan proses migrasi dari perangkat dengan standar 802.11 ke perangkat 802.11g (802.11b/g 2,4 GHz) [11].

Muncul dengan sejumlah spesifikasi yang sangat menjanjikan telah menjadikan teknologi jaringan nirkabel berbasis 802.11g-2003 mampu untuk membuat pasar WLAN tumbuh dengan cepat. Pasar menganggap bahwa teknologi WLAN ini telah memenuhi kebutuhan dasar para penggunanya. 802.11g merupakan standar yang sangat populer sehingga sering disebut-sebut dengan singkatan 54g, dimana para penggunanya dapat mengadopsi solusi WLAN ini untuk memperoleh konektivitas dan mobilitas yang fleksibel serta pengembangannya dapat dilakukan dengan harga yang rendah dibandingkan dengan LAN konvensional berbasis kabel [13].

C. IEEE 802.11n-2009

Peningkatan berbagai fungsionalitas WLAN telah membawa perubahan terhadap gaya hidup manusia modern. Penggunaan gadget seperti tablet PC dan *smartphone* seolah-olah menjadi *style* dan *trend* baru dalam kehidupan manusia. Peningkatan terhadap *datarate* WLAN yang mencapai 54Mbps telah mengarahkan pasar teknologi ini secara tumbuh dengan sangat cepat dan merambah kesemua sektor di kelas SMB bahkan kelas *enterprise* mulai tertarik untuk melirik teknologi ini. Namun kapasitas *datarate* masih menjadi perhatian utama pengguna teknologi ini. Setelah 802.11g ditetapkan, IEEE working group menginisiasi proyek yang menargetkan

datarate sebagai sasaran utama dalam pengembangan WLAN lanjutan. Akhirnya pada kuartal keempat tahun 2009, IEEE menetapkan standar IEEE 802.11n-2009 sebagai standar tambahan teknologi WLAN. Standar ini merupakan amandemen kelima dengan judul "*Enhancements for Higher Throughput (HT)*" [14].

IEEE 802.11n merupakan proyek pertama dimana *datarate* diprioritaskan diatas lapisan MAC. Standar ini menyediakan fungsionalitas WLAN ke penggunanya setingkat diatas dengan penggunaan teknologi Fast Ethernet (802.3u). *Fast Ethernet* merupakan teknologi jaringan kabel yang mampu mengirimkan data penggunanya dengan kecepatan 100 Mbps, dimana 802.11n mampu mentransmisikan data dengan kecepatan sampai dengan 600 Mbps [11]. Kapasitas *throughput* yang besar diharapkan mampu meningkatkan pengalaman pengguna untuk menjalankan aplikasi multimedia seperti *video streaming* dan *games* beresolusi tinggi. IEEE 802.11n juga diharapkan mampu membuka dan meningkatkan segmen pasar baru untuk teknologi WLAN.

IEEE 802.11n PHY menggunakan HT-OFDM yang dapat beroperasi pada pita frekuensi 2.4 GHz dan 5GHz. Fitur utama dari standar IEEE 802.11n adalah kapabilitas dari *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) untuk meningkatkan *datarate* sehingga mencapai jumlah ratusan mega bit per detik. Teknik MIMO memanfaatkan penggunaan beberapa antena untuk meningkatkan jarak, kehandalan dan kecepatan pen-transmisian data [14, 15].

Konsep MIMO memungkinkan aliran data dapat dikirim sampai dengan empat stream secara bersamaan baik menggunakan saluran 20 MHz atau 40 MHz melalui empat antena. Penggunaan MIMO pada 802.11n mengimplementasikan spatial multiplexing, sehingga secara dramatis dapat meningkatkan kapasitas *throughput*. Implementasi dari spatial multiplexing akan mengizinkan pengiriman dan penerimaan data stream secara terpisah (*spatial streams*). IEEE 802.11n menetapkan bahwa maksimum penggunaan hanya empat *transmitter* pada sisi stasiun (STA) pengirim dan empat *receiver* pada STA penerima [14].

Meskipun 802.11n menggunakan teknik penyebaran spektrum radio berbasis OFDM, teknologi WLAN ini menyediakan kompatibilitas untuk proses pengintegrasian perangkat WLAN 802.11a, 802.11b dan 802.11g dengan perangkat 802.11n. Hal ini dimungkinkan karena pada saat standar ini diratifikasi tetap menyediakan beberapa opsi kelas-kelas modulasi yang meliputi: OFDM, HR/DSSS, ERP-PBCC, DSSS-OFDM, HT-OFDM [14]. Oleh karena itu, para pengguna jaringan nirkabel yang sudah menginvestasikan perangkat WLAN yang berbasis pada standar sebelumnya tetap berpeluang melakukan pengembangan jaringan lanjutannya dengan menggunakan 802.11n tanpa perlu khawatir dengan interoperabilitas dan kompatibilitas.

D. IEEE 802.11ac-2013

Seolah tidak mau tersaingi oleh peningkatan *datarate*

yang dimiliki oleh jaringan kabel yang sudah mencapai ratusan giga bit per detik [16], IEEE working group kembali menginisiasi standar untuk giga bit WLAN. Pada awal tahun 2014, IEEE akhirnya merilis standar baru untuk memperkaya khasanah standar-standar WLAN sebelumnya dengan nama IEEE 802.11ac-2013 [17]. Munculnya 802.11ac membuka peluang besar bahwa kinerja teknologi jaringan area lokal nirkabel ini dapat ditingkatkan untuk mencapai 1 Gbps. Detail tentang IEEE 802.11ac sebagai standar gigabit WLAN akan dipaparkan secara komprehensif pada bagian V artikel ini.

IV. IEEE 802.11AC SEBAGAI STANDAR GIGABIT WIRELESS LAN

802.11ac adalah standar yang ditetapkan IEEE sebagai penerus teknologi Wi-Fi generasi kelima. Kemunculan standar ini dilandasi oleh semangat optimisme yang tinggi untuk meningkat produktivitas kerja disaat kapanpun dan dimanapun serta didorong oleh perubahan kebutuhan pasar yang tinggi untuk mendapatkan *throughput* yang sangat tinggi pada lingkungan *multi-user*.

Sebagaimana diketahui sebelumnya, standar 802.11a tidak pernah mendapat perhatian dan peluang untuk berkembang dikarenakan faktor harga dan kebuntuan penggunaan WLAN pada sejumlah perusahaan-perusahaan *enterprise*. Namun di sisi lain, penggunaan WLAN 802.11b/g dianggap sangat efektif dan efisien serta cenderung didominasi oleh kelas SMB. Hal ini menggerakkan kelas *enterprise* serius untuk mengevaluasi dan mulai menginvestasikan pada WLAN 802.11b/g dimana WLAN versi ini dapat diperoleh dengan harga yang rasional dan memiliki kinerja yang sudah lumayan baik, namun kedua hal ini belum cukup dibandingkan dengan mengganti jaringan kabel yang sudah ada, khususnya dari sisi keamanan jaringan. Dampak dari hasil evaluasi dan peningkatan kinerja WLAN diawali dengan munculnya 802.11n. Isu utama tentang keterbatasan 802.11n masih terletak pada kapasitas *throughput* dan jarak area jangkauan yang masih terbatas. Kapasitas *throughput* WLAN yang dijanjikan masih dibawah standar jaringan gigabit *Ethernet* LAN [5].

Kemunculan IEEE 802.11ac diharapkan dapat menjawab berbagai tantangan tersebut. Sesuai dengan nama amandemen yang tertera pada dokumen 802.11ac: “*Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz*”, bahwa prioritas utama standar ini adalah peningkatan kapasitas *throughput* yang sangat tinggi. Oleh karena itu, artikel ini akan merangkum apa tujuan dan sasaran yang ingin dicapai serta bagaimana spesifikasi dan tingkat kompatibilitas ditinjau dari sisi PHY dan MAC berdasarkan dokumen standar IEEE 802.11ac-2013, sebagai berikut [17, 18, 19, 20]:

A. Tujuan dan Sasaran

Sebagaimana yang tertuang dalam dokumen standar IEEE 802.11ac, tujuan dari amandemen ini adalah untuk

meningkatkan pengalaman para pengguna IEEE 802.11 jaringan area lokal nirkabel (WLAN) dengan menyediakan *throughput* secara signifikan pada *Basic Service Set* (BSS) yang lebih tinggi untuk area aplikasi WLAN yang ada. Standar ini juga diharapkan memungkinkan terbukanya segmen pasar baru untuk WLAN yang beroperasi di bawah 6 GHz. Selain itu standar ini bertujuan untuk memfasilitasi distribusi beberapa aliran data multimedia secara nirkabel.

Sasarannya adalah untuk meningkatkan kinerja WLAN secara signifikan untuk sejumlah *client* yang didukung oleh sebuah STA (AP) sehingga setiap *client* memiliki kapasitas yang besar untuk mengakses AP. Dalam hal ini AP akan menyediakan aliran data dalam jumlah yang tinggi untuk mendukung *video stream* secara paralel ke masing-masing *client*.

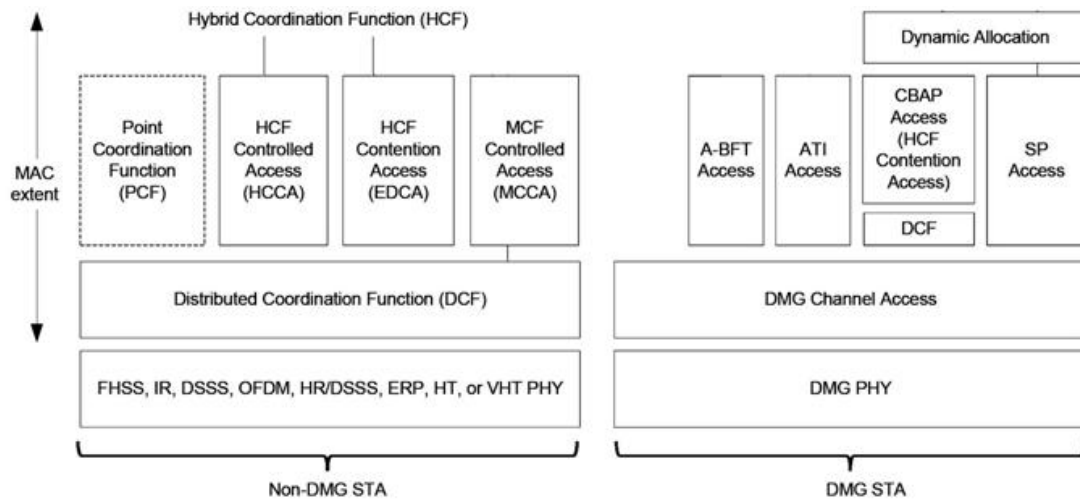
B. Spesifikasi

Kunci utama untuk memperoleh *data rate* yang sangat tinggi pada jaringan area lokal nirkabel adalah meningkatkan spesifikasi yang lebih baik daripada yang telah dimiliki sebelumnya. Pada rancangan 802.11ac, sejumlah peningkatan dilakukan meliputi: pelebaran pita kanal (80 dan 160 MHz), peningkatan aliran data (*spatial data streams*) sampai dengan delapan streams, dan menambahkan metode 256 *Quadrature Amplitude Modulation* (256-QAM) untuk mengefisienkan teknik modulasi pada lapisan PHY. Untuk mendukung hal tersebut IEEE menetapkan bahwa 802.11ac beroperasi pada pita frekuensi dibawah 6 GHz dan teknik antena yang digunakan adalah *Multiple-User MIMO* (MU-MIMO). Standar ini juga menyederhanakan transmisi beamforming dan memperbesar agregasi *frame-frame* data pada lapisan MAC.

1. Lapisan PHY

Secara umum, amandemen 802.11ac menawarkan solusi teknologi baru untuk lapisan PHY yaitu: peningkatan *bandwidth* yang didukung dengan peningkatan metode modulasi, *multiple streams* dengan multiple antena serta *Forward Error Correction* (FEC) untuk mendukung kecepatan aliran data hingga satu giga bit per detik. Standar 802.11ac-2013 tidak merubah PHY 802.11 sebelumnya. Penambahan utama pada lapisan PHY 802.11ac adalah munculnya *Very High Throughput* PHY (VHT PHY) pada klausul 22, dimana ERP PHY (klausul 19) dan HT PHY (klausul 20) tetap menjadi bagian dari 802.11 yang secara masing-masing masih diperuntukkan untuk standar WLAN 802.11g dan 802.11n. VHT PHY sendiri dikembangkan berbasis pada ERP PHY dimana teknik penyebaran spektrum radio yang digunakan untuk VHT PHY tetap mengandalkan metode OFDM.

Berbeda dengan HT-VHT, lapisan VHT PHY menetapkan bahwa maksimum jumlah aliran ruang-waktu (*space-time streams*) yang didukung untuk *mem-forward* data adalah delapan aliran. VHT PHY telah menyediakan dukungan transmisi untuk *multi-user* (MU) *downlink*, dimana sebuah transmisi MU *downlink* mendukung



Gambar 3. Arsitektur MAC 802.11 [17, 18]

hingga empat pengguna dengan empat aliran ruang-waktu per pengguna dengan jumlah ruang-waktu *stream* tidak melebihi delapan aliran.

Untuk lebar pita saluran, VHT PHY menyediakan dukungan untuk 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, dan 160 MHz (*contiguous*) serta dukungan untuk 80+80 MHz (*non-contiguous*). *Subcarrier* (pembawa) data VHT PHY disebarkan menggunakan *Modulation and Coding Scheme* (MCS) harus mendukung: *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Sedangkan pengkodean FEC dapat menggunakan sistem penyandian secara konvolusional ataupun *Low-Density Parity-Check* (LDPC), dimana kelajuan pengkodean (*coding rates*) terdiri dari 1/2, 2/3, 3/4, and 5/6.

Setiap STA VHT diwajibkan untuk mendukung sejumlah fitur, yang meliputi: pengiriman dan penerimaan format data dari non-HT dan format duplikat non-HT, HT dengan format campuran serta format VHT. STA VHT juga diwajibkan untuk menyediakan lebar pita saluran 20 MHz, 40 MHz, dan 80 MHz serta mendukung pengiriman dan penerimaan *single spatial stream* VHT-MCS dari 0 hingga 7 di semua lebar pita saluran yang didukung. Selain itu, STA VHT dapat menyediakan dukungan untuk lebar pita saluran 160 Mhz dan 80+80 Mhz serta mendukung pengiriman dan penerimaan VHT-MCS dari 8 hingga 9 pada kedua lebar pita saluran tersebut. Hal ini

berarti sebuah AP 802.11ac PHY harus mampu memberi dukungan layanan untuk berbagai *multi-user* (MU) *physical layer* (PHY) *protocol data unit* (PPDU) berbasis 802.11b/g/n.

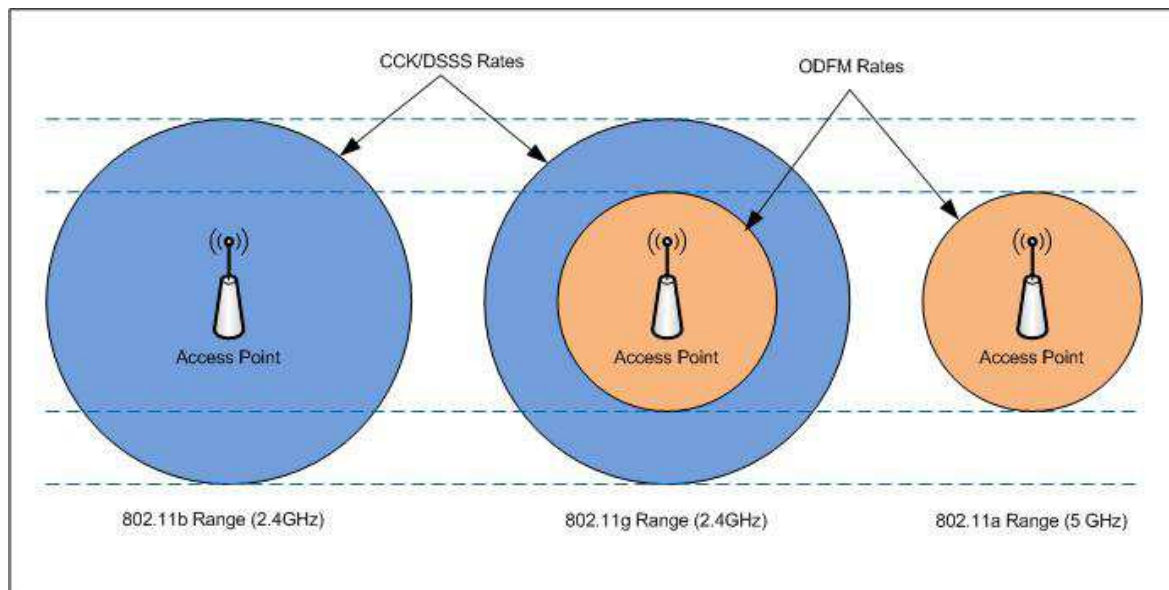
2. Lapisan MAC

Berbeda dengan arsitektur MAC 802.11 sebelumnya, metode untuk mengakses lapisan MAC 802.11 (baru) dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu *Directional Multi Gigabit* (DMG) STA dan non-DMG STA. Untuk mengakses lapisan medium, non-DMG STA dapat beroperasi menggunakan salah satu teknik penyebaran spektrum radio yang disediakan oleh lapisan PHY yang meliputi: FHSS, IR, DSSS, OFDM, HR/DSSS, ERP, HT ataupun VHT PHY. Sedangkan DMG STA hanya dapat beroperasi menggunakan DMG PHY. DMG PHY adalah teknologi yang disediakan untuk mendukung 802.11ad.

Untuk mendukung proses perpindahan data, Non-DMG STA menggunakan metode akses yang disebut *Distributed Coordination Function* (DCF). Protokol yang digunakan oleh DCF untuk mengatur metode akses adalah CSMA/CD. Standar 802.11 MAC menetapkan bahwa setiap Non-DMG STA harus mengimplementasikan DCF sebagai metode aksesnya. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 3 bahwa metode akses DCF pada sub-lapisan MAC dapat diakses oleh non-DMG STA dengan menggunakan VHT PHY (802.11ac), HT-PHY (802.11n),

Tabel 1. Perbandingan Spesifikasi WLAN

WLAN Standard	PHY Term	Frekuensi (Ghz)		Mekanisme Penyebaran Spektrum Radio				Lebar Pita Saluran (MHz)	RF Modulation dan Coding Scheme	Sistem Antena	Spatial Data Stream (Max.)	Datarate (Mbps) (Max.)
		2.4	5	FHSS	DSSS	IR	OFDM					
802.11-1997	FHSS/DSSS	V		V	V	V		20	FSK			
	PSK	1	2									
802.11a-1999	OFDM		V				V	20	64 QAM	SISO	1	54
802.11b-1999	HR/DSSS	V			V			20	CCK	SISO	1	11
802.11g-2003	ERP PHY	V			V		V	20	CCK	SISO	1	54
802.11n-2009	HT PHY	V	V		V		V	20/40	64 QAM	MIMO	4	600
802.11ac-2013	VHT PHY		V		V		V	20/40/ 80/160	256 QAM	MU-MIMO	8	6933.3



Gambar 4. Jangkauan WLAN 802.11b, 802.11g dan 802.11a [13]

ERP-PHY (802.11g), HR/DSSS PHY (802.11b), OFDM (802.11a), DSSS, IR, ataupun FHSS (802.11-1997), maka tingkat interoperabilitas dan kompatibilitas sebuah Non-DMG STA berbasis standar 802.11ac mampu memberikan dukungan untuk sejumlah *client* yang menggunakan perangkat standar-standar sebelumnya (802.11b/g/n).

V. PERBANDINGAN STANDARD DAN REGULASI WIRELESS LAN

Teknologi WLAN (Wi-Fi) telah berevolusi secara bertahap dan telah menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan, baik dari sisi pengembangan teknologi maupun disisi jumlah pengguna. Evolusi teknologi ini diawali dengan ditetapkannya standar IEEE 802.11-1997 hingga munculnya IEEE 802.11ac-2013 sebagai generasi Wi-Fi yang kelima. Ringkasan tentang tingkat capaian dan perbedaan spesifikasi setiap standar teknologi WLAN dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan yang sangat signifikan dibandingkan dengan standar sebelumnya pertama sekali ditunjukkan oleh teknologi WLAN 802.11n-2009. Teknologi ini memiliki kinerja yang jauh lebih baik dari para pendahulunya (802.11a, 802.11b dan 802.11g). Teknologi WLAN 802.11n menyediakan kemampuan jaringan yang handal dengan menempatkan pengoperasian antenna dengan teknik MIMO, kombinasi dua jenis pita saluran 20 Mhz dan 40 MHz (*channel bonding*), dan memiliki protokol yang lebih efisien serta mengadopsi skema penyandian dan modulasi 64-QAM. Selain itu, 802.11n merupakan standar yang pertama yang beroperasi dengan *dual-band* yaitu pada pita frekuensi 2.4 GHz dan 5 GHz. Hal ini berdampak terhadap peningkatan *datarate* yang tinggi sehingga standar ini disebut dengan *High Throughput* (HT) Standar ini berhasil meningkatkan *datarate* dari kecepatan sebelumnya 54 Mbps menjadi 600 Mbps.

Namun demikian, kontribusi standar 802.11g-2003 terhadap kemajuan teknologi WLAN sangat besar. Ketika standar 802.11a menawarkan kecepatan sampai dengan 54 Mbps, namun terkendala oleh faktor keterbatasan jarak area jangkauan dan harga yang tidak rasional sehingga justru 802.11b yang mendominasi pasar. Standar 802.11g mengambil manfaat penggunaan OFDM yang sebelumnya tidak sukses ketika digunakan oleh 802.11a. Standar ini menawarkan opsi penggabungan DSSS/OFDM sehingga *datarate* yang sebelumnya ditawarkan oleh 802.11b sebesar 11 Mbps dapat ditingkatkan menjadi 54 Mbps sebagaimana kecepatan yang ditawarkan oleh 802.11a. Ilustrasi kesuksesan 802.11g menggunakan DSSS/OFDM dari sisi peningkatan *datarate* dan jarak area jangkauan dapat dilihat pada Gambar 4.

Mekanisme penyebaran spektrum 802.11g sangat efektif dan efisien untuk meningkatkan *datarate* sekaligus perluasan jarak area jangkauan. Hal ini merupakan salah satu kontribusi yang sangat besar dari standar ini dimana mekanisme ini kemudian diadopsi kembali pada standar 802.11n. IEEE 802.11n merupakan standar yang memprioritaskan HT sehingga sebuah datastream dapat didistribusikan dengan cara membagi menjadi beberapa bagian yang disebut dengan *spatial stream* dan mengirimkannya masing-masing *spatial stream* melalui antenna yang berbeda-beda. Teknologi WLAN 802.11n sukses merebut segmen pasar baru, khususnya kalangan *enterprise*.

Kesuksesan 802.11n diikuti oleh lahirnya generasi WLAN berikutnya yaitu 802.11ac-2013 dimana peningkatan *datarate* yang disediakan jauh lebih signifikan. Peningkatan *datarate* yang hampir mencapai 7 Gbps menyebabkan standar 802.11ac disebut sebagai *Very High Throughput* (VHT). Pada dasarnya 802.11ac bukan teknologi baru namun merupakan hasil evolusi dari WLAN generasi sebelumnya (802.11n). Sebagai contoh, WLAN 802.11n mengadopsi MIMO sebagai

teknologi antena dengan maksimum *spatial stream* empat, sedangkan 802.11ac menetapkan MU-MIMO dengan maksimum delapan *spatial stream*. Selain itu, 802.11n adalah standar pertama menetapkan replikasi terhadap lebar pita (*channel bonding*) saluran dimana sebelumnya menggunakan 20 MHz, 802.11n mereplikasi sebanyak dua kali sehingga lebar pita saluran menjadi 40 MHz. Hal ini diikuti oleh standar 802.11ac, dimana standar ini melebarkan pita saluran dengan mereplikasikan sebanyak delapan kali sehingga lebar pita saluran dapat mencapai 160 MHz.

VI. KESIMPULAN

Kapasitas *throughput* yang tinggi dan tingkat *latency* yang rendah merupakan pertimbangan utama dalam setiap pengembangan teknologi jaringan komputer. Munculnya IEEE 802.11ac-2013 sebagai standar yang pertama sekali ditetapkan untuk gigabit WLAN akan memungkinkan pengguna teknologi ini untuk memperoleh *throughput* yang sangat tinggi pada lingkungan *multi-user*. Beberapa hal yang menjadi kunci peningkatan *throughput* pada 802.11ac VHT diantaranya meliputi: (1) penggunaan MU-MIMO untuk mendukung *multiple spatial stream* hingga 8 *data stream*, (2) penggunaan *channel bonding* untuk pelebaran ukuran pita saluran/kanal (80, 80+80 dan 160 MHz) yang beroperasi pada frekuensi ISM 5 GHz, dan (3) penggunaan skema modulasi 256-QAM dengan mekanisme penyebaran spektrum radio OFDM. Sejumlah peningkatan tersebut akan mengizinkan para pengguna jaringan nirkabel untuk melakukan *transfer* data dengan kecepatan hingga 7 Gbps.

Sebagaimana yang telah dipaparkan sebelumnya, 802.11ac bukanlah standar yang berdiri sendiri namun tetap dalam ruang lingkup standar 802.11. Selain itu, teknologi WLAN 802.11ac merupakan hasil pengembangan dari teknologi yang sudah dipopulerkan oleh 802.11n. Hal ini menjadikan tingkat kompatibilitas dan interoperabilitas 802.11ac dengan standar-standar sebelumnya tetap terjaga dengan baik. Oleh karena itu, para pengguna yang telah menginvestasikan sejumlah perangkat WLAN berbasis pada standar sebelumnya dapat mengadopsi solusi yang ditawarkan oleh 802.11ac tanpa perlu khawatir dengan interoperabilitas dan kompatibilitas dengan perangkat yang telah dimiliki sebelumnya.

REFERENSI

- [1] J.P. Bouchard, B. Hoffman, and R. T. Llamas, "Worldwide business use smartphones 2014-2016 forecast analysis," IDC, Jun. 2014.
- [2] M. S. Gast, *The Definitive Guide of 802.11 Wireless Network*, USA: O'Reilly Media Inc., 2005.
- [3] V. Kelly, "New IEEE 802.11ac Specification Driven By Evolving Market Need For Higher, Multi-user Throughput In Wireless LANs," [Online]. Available at http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html.
- [4] Cisco Aironet Access point Module for 802.11ac [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/interfaces-modules/aironet-access-point-module-802-11ac/index.html>.
- [5] M. Spanbauer, *The Future of Wireless: Preparing for 802.11ac While Optimizing Your Current WLAN*, Current Analysis Inc., 2012.
- [6] J. Smith, J. Woodhams, and R. Marg, *Controlled-Based Wireless LAN Fundamentals*, Cisco Press, Cisco System Inc, 2011.
- [7] E. Danielyan, "IEEE 802.11," *The Internet Protocol Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 2-13, Mar. 2001.
- [8] IEEE Computer Society, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," IEEE Standard 802.11-1999: Part 11, Sept. 1999.
- [9] IEEE Computer Society, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, higher-speed physical layer extension in the 5 GHz band," IEEE Standard 802.11a-1999: Part 11, Sept. 1999.
- [10] IEEE Computer Society, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band," IEEE Standard 802.11b-1999: Part 11, Sept. 1999.
- [11] R. G. Hiertz, et. al., "The IEEE 802.11 universe," *IEEE Communication Magazine*, pp.62-70, Jan. 2010.
- [12] D. Vassis, G. Kormentzas, A. Rouskas, and I. Maglogiannis, "The IEEE 802.11 g standard for high data rate WLANs," *IEEE Network*, vol. 19, pp 21-26, 2005.
- [13] IEEE 802.11g: The New Mainstream Wireless LAN Standard, [Online]. Available: www.54g.org
- [14] IEEE Computer Society, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 5: Enhancement for Higher Throughput," IEEE Standard 802.11n-2009: Part 11, Oct. 2009.
- [15] X. Yang, "IEEE 802.11 n: enhancements for higher throughput in wireless LANs," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 82-9, 2005.
- [16] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Ethernet" IEEE Std 802.3™-2012, Dec. 2012.
- [17] IEEE Computer Society, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz," IEEE Standard 802.11ac-2013: Part 11, Dec. 2013.
- [18] IEEE Computer Society, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 60 GHz," IEEE Standard 802.11ad-2013: Part 11, Dec. 2013.
- [19] L. Verma, M. Fakhrazadeh and S. Choi, "Wifi on steroids: 802.11ac and 802.11ad," *IEEE Wireless Communications Journal*, vol. 20, no.6, pp. 30-35, Dec. 2013.
- [20] O. Bejarano, E. W. Knightly, M. Park, "IEEE 802.11ac: From Channelization to Multi-user MIMO," *IEEE Communications Magazine*, pp. 84-90, Oct. 2013.